論　説

火山 第60巻 (2015)
第3号 357-363頁

K-GPSを用いた火山地形の計測
—伊豆大室山での試行—

野口里奈*・吉田朱里**・猿谷友孝***・西川泰弘*・栗田　敬*

（2014年8月28日受付，2015年5月20日受理）

Measurement of Volcanic Morphology by Using K-GPS
— A Trial at Omuroyama Scoria Cone in Izu, Japan —

Rina Noguchi*, Akari Yoshida**, Tomotaka Saruya***, Yasuhiro Nishikawa* and Kei Kurita*

Morphometrical studies on small volcanic edifices such as scoria cones have been extensively conducted. Nevertheless, some morphometric parameters have been difficult to obtain. For instance, it is often difficult to measure a slope angle of volcano edifice because DEM (Digital Elevation Model) with high spatial resolution are not always available. We used the K-GPS (Kinematic Global Positioning System) for high resolution measurement of the slope angle of Omuroyama, a typical young scoria cone in Eastern Izu, Japan, assuming no detailed DEM available in the region. We show the existence of constant slope of 32° from the base to the top. The result of the K-GPS measurement is consistent with the existing DEM of this region. We report the measuring system is simple and viable for summary survey of slope angle where no DEMs are available.

Key words: pyroclastic cone, slope angle, K-GPS, Izu Omuroyama

1. はじめに

火山体の形状は噴火の特性や噴火当時の環境に関する多くの情報を我々に与えてくれる．同時にそれは形成終了後から時間経過とともに風化浸食や後続の噴火等の影響で変化し，火山地形史として1つの歴史を我々に示す．すなわち現在我々が目にしている火山体の形状は形成過程と侵食等の二次過程が作り出した結果であり，両者をどのように分離するのかが火山地形学の枢要な研究課題である．火山体形状からの成因解釈は，リモートセンシングによる地形データしかない惑星科学においては極めて重要であり，地球上の類似地形に比較研究が求められるのが常である．例えば火星の火山には，ハワイやアイスランドに一般的な玄武岩質溶岩でできた火山と類似しているものがあり比較研究が多くなされている（例えば Keszthelyi *et al.,* 2000）．対比されるべき地球の火山のデータに関しては近年 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) などグローバルスケールでの DEM (Digital Elevation Model) が整備され，火山体の傾斜特性に基づいた形状の研究は大きな進展を見せている（例えば Grosse *et al.*, 2009；Grosse *et al.*, 2014；Karátson *et al.*, 2010）．一方，より小型の火山体に関してはグローバルスケールの DEM では解像度が足りず，より高精度の高度情報が必要となる．このような火山微地形の研究には LiDAR (Light Detection And Ranging) によるエトナ火砕丘の形状解析 (Favalli *et al.,* 2009) や火砕流堆積物の微細構造解析 (Jessop *et al.,* 2012)，DGPS (Differential-Global Positioning System) を用いた溶岩流の解析 (Zimbelman *et al.,* 2008) などの先例がある．

* 〒113-0032　東京都文京区弥生1-1-1
東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.
** 〒251-0873　神奈川県藤沢市みその台1-4
聖園女学院中学校・高等学校
Misono Junior and Senior High school, 1-4 Misonodai, Fujisawa, Kanagawa 251-0873, Japan.
*** 〒190-8518　東京都立川市緑町10-3
国立極地研究所
National Institute of Polar Research, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518, Japan.

Corresponding author: Rina Noguchi
e-mail: rina@eri.u-tokyo.ac.jp

我々は火星におけるスコリア丘やルートレスコーン等の火砕丘に着目して研究を進めている．比較研究で参照すべき地球の火砕丘に関しては近年 DEM に基づいた形状解析が多数行われている．火星のルートレスコーンはしばしばアイスランドの例との比較がなされる．しかしながら，小型であるためアイスランドに既存の DEM では検出できず，形状の定量的な記載はない．最近では Hamilton *et al.* (2010 a) により DGPS を用いた調査がアイスランド・ラキ火山周辺において実施され，鉛直方向最高精度±0.06 m の DTM (Digital Terrain Model) が作られた． Hamilton *et al.* (2010 a；b) ではルートレスコーンの位置や直径とその構成物について詳しく述べられているが，その山体傾斜については触れられていない．上記以外に火砕丘形状の記載を行った報告はあるが，火山体全体の大まかな形状を対象にしている場合が多く，形成過程や浸食の時間変化などの解明を目的とした山体の傾斜変化等詳細な地形解析の研究例は少ない．

火砕丘は，火口から弾道放出された火砕物が周囲に降り積もることで形成される．この外形（山体傾斜）は，構成している物質の安息角（後述）によって決まると考えられている (Wood, 1980) が，実際に傾斜角が山体を通して一定であるのか，詳細な検討が成されている例は極めて少ない．Kereszturi *et al.* (2012) ではスコリア丘斜面全体での傾斜角を議論しているが，高度に応じた特徴が見られるかどうかについては考察していない．粒子の堆積によって生じる斜面の安定度は近年の粉体物理の進展により理解が大きく進んでいる．淘汰度のよい球状の粒子で，粒子同士の粘着力や摩擦力が少ない場合，30° 程度の傾斜角を持つ斜面が安定に形成され，これは「安息角」として知られている．これまでの研究で 1) 粒子が球形からはずれ, いびつになる (Robinson and Friedman, 2002), 2) 淘汰度が悪い (Arciaga *et al.,* 2009), 3) 粒子間の粘着力 (Samadani and Kudrolli, 2001) により安息角が大きくなる，という系統的な挙動が知られている．そのため，山体傾斜角の変化から構成物の形状・特性の変化，さらには噴火スタイルの変遷を読み解くことができると期待される．しかし，火砕丘傾斜角の研究実績がほとんどないことから上記の関連性は確認されていない．もし構成物の違いによる火砕丘斜面傾斜角の特徴があれば，現在直接の調査が困難な他天体での構成物推定や噴火スタイルの検討に応用することができる．例えば火星では，領域は限られるものの水平方向約 1 m，鉛直方向数 10 cm の解像度の DTM が作られており，火砕丘の斜面傾斜を議論することが十分可能である．

本稿では詳細な DEM の整備されていない地域を想定して K-GPS を用いた簡易測量法が火山体の微地形，特に山体の傾斜解析に有効であることを報告する．K-GPS とは Kinematic-Global Positioning System の略で，移動しながらの高精度測位を可能とする技術である（例えば Hofmann-Wellenhof *etal.,* 2001；佐田，2003）．基準点と測量動点それぞれの受信機（2 台）を基本構成とする．ここでは伊豆半島大室山での試験測量，既存の DEM との比較結果を示す．大室山は 1) 我々の研究対象であるルートレスコーンと類似の円錐状の山体を示していること，2) GPS 測位の妨げとなるような植生がないこと，さらに 3) 国土地理院による基盤地図情報 DEM があるため測量結果の比較を行うことができるという観点から選定した．測量では東側斜面の直登による測位を行い，斜面傾斜角を求めた．

2. 伊豆半島大室山概要

今回測量の対象とした大室山は伊豆半島東部に位置するスコリア丘である．スコリア丘をはじめとする火砕丘は側火山や単成火山群として形成されるものがほとんどであり，大室山は「東伊豆単成火山群」の 1 つの火山である．大室山の基底直径は 1000 m，比高は 220 m，火口径は 250 m，火口深は 70 m とされている（守屋，1986）．頂上には国土地理院の三等三角点（基準点コード：TR35239208701）が設置されており，その標高は 580.01 m（世界測地系，測地成果 2011）とされている．大室山は約 4000 年前の噴火によって形成されたことが，火山灰層から発見された樹木片の^{14}C 年代測定により求められている（3710±95 yr.B.P.；高橋・和田，1998）．大室山テフラは古谷野・他 (1996) によって 5 つに区分されており, それに応じて 5 段階の噴火活動が提案されている．それによると大室山の山体の大部分を構成しているのは軽石（直径：数 mm～5 cm）とスコリア（直径：数 mm～3 cm）であり，その上位にはマグマ水蒸気爆発による火山シルトが存在している．大室山の基底部からは東部の城ヶ崎海岸に達する量の溶岩（380×10^9 kg；早川・小山，1992）が噴出している．なお，徒歩での登山は基本的に禁止されているが，今回は特別に許可を得て調査を実施した．

3. 観測及び取得データ解析について

測量は 2013 年 6 月 3–4 日に伊豆半島東部の大室山で実施した．機器は東京大学地震研究所の保有する JAVAD 社 GNSS (Global Navigation Satellite System) の Sigma-G2T（受信機）と GrANT-G3T（アンテナ）を 2 組用いてそれぞれ基準点，測量動点とした．本測量では衛星電波の受信を継続することにより GPS 受信機の移動経路中の位置を連続的に求める連続キネマティック方式



Fig. 1.　A style of K-GPS measurement in this study. An antenna is mounted on a helmet.

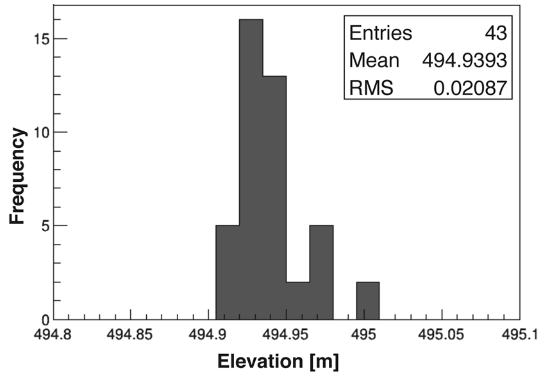


Fig. 2.　Standard deviation of the measured vertical positions during 3.5-min rest time. This gives an actual accuracy of the measurement.

を採用した．測量動点については斜面を登る都合上両手が空くスタイルが良いと判断し，ヘルメットの上にアンテナを取り付けられるよう改良したものをかぶって測量を実施した (Fig. 1)．サンプリング周期は 5 秒，仰角は 15°以上とし，座標系は WGS 84 を用いた．以降断りのない限り楕円体高を標高として用いる．解析には，GPS 受信機に記録したデータを測量作業終了後にパソコンに転送して基線解析を行うという後処理方式を採用した．測量データの取得には JAVAD 社の TriVU[注1] を用い，取得したデータの RINEX ファイルへの変換には同社提供の JPS2LIN，後処理解析には RTKLIB v.2.4.2[注2] を使用した．データ量にも依るが測量後短時間で簡易解析を行って結果を確認することができる．最終的な解析では IGS (International GNSS Service) により提供されている衛星データ (rapid product：igr17432.sp3) を CDDIS[注3] から取得し用いた．今回使用した機器でのキネマティック測位精度は水平方向 1 cm＋1 ppm，高度方向 1.5 cm＋1.5 ppm である（取扱説明書上の値）．後処理解析による測位解には種類があり，それぞれ精度が異なる（Fix 解：20 mm 程度，Float 解：数 10 cm～数 m 程度，単独測位解：10 m 程度；佐田，2003）が，連続キネマティック方式の場合移動時の動揺により精度はさらに低くなる（平面誤差で 5～10 cm；佐田，2003）．計測中の静止時（3.5 分間）における高度の測量値のヒストグラムを Fig. 2 に示す．このデータは測量の実質的な誤差に対応すると考えられる．静止 3.5 分間における解析結果（Fix 解）の標準偏差は，南北方向 0.11 m，東西方向 0.05 m，高度 0.02 m であった．Fig. 3 には基準点の位置及び測量動点を地形図上に示した．なお，測量中は常に衛星が 5 個以上捉えられており，K-GPS 測量を実施するのに支障はなかった．

注1)　http://www.javad.com/jgnss/products/software/trivu.html
注2)　An Open Source Program Package for GNSS Positioning, http://www.rtklib.com/
注3)　Crustal Dynamics Data Information System, http://igscb.jpl.nasa.gov/components/dcnav/cddis_products_wwww.html

4.　斜面傾斜角計算手法及び計算結果

K-GPS 測量により得られた位置データ（緯度，経度，楕円体高）を基に山体斜面における傾斜角を計算した．データは時系列（5 秒間隔）であり，登攀速度が必ずしも一定でないため各点間の水平距離にはばらつきがある (0.82±0.20 m)．本調査で得られたデータはほぼ直線であるため，傾斜角は選定した 2 点間の水平距離（slope calculation distance，以降 SCD と呼ぶ）とその間の高度差の逆正接から求め，中間点にプロットした．まずは，測量開始点とそこから数ポイント先の点との間で傾斜を求め，その後，このペアーを順次移動させて頂上まで計算し高度変化に伴う傾斜角変化プロファイルを作成した (Fig. 4)．SCD によって傾斜値にどう影響があるか判断するために大室山中腹での平均傾斜（標高 500 m 最傍点を中間した 5 点における傾斜の平均）を比較した (Fig. 5)．これを見ると，2 m から 36 m の間では SCD の値に依存せず平均傾斜は 31.9°～32.3°でほぼ一定であることが分かる．Fig. 6 は大室山東側山体の傾斜変化を表しているグラフであり，縦軸が標高，横軸が山体の傾斜を示している．図中の 3 つのグラフは 3 種類の SCD (10.06±

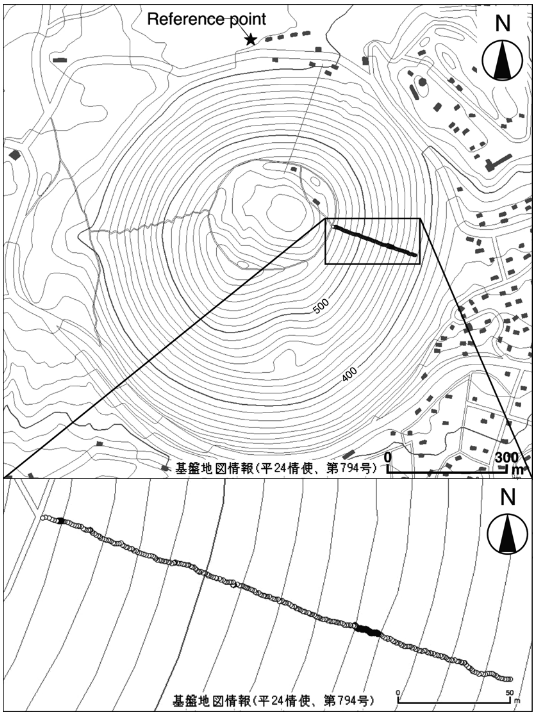


Fig. 3. Measured points in this study (open and solid circles represent fixed and float points). This figure is made from a data of Kiban-Chizu-Jouhou（基盤地図情報）of Geospatial Information Authority of Japan, by QGIS (Quantum Geographic Information System). The elevation of this map doesn't include the geoidal height.

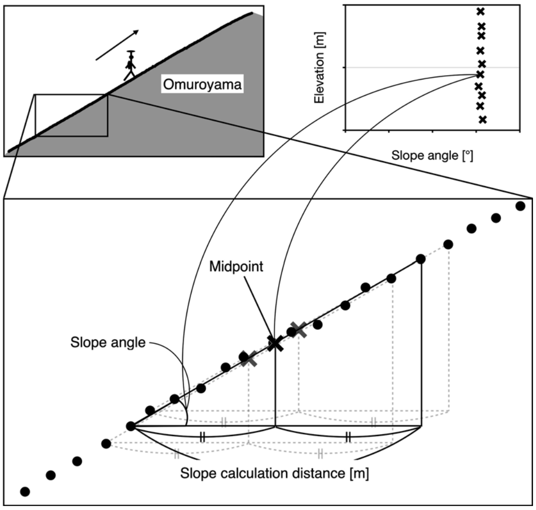


Fig. 4. Schematic diagram for estimating slope angle from K-GPS data. The slope angle was calculated by arc tangent of vertical and horizontal distances between selected 2 points.

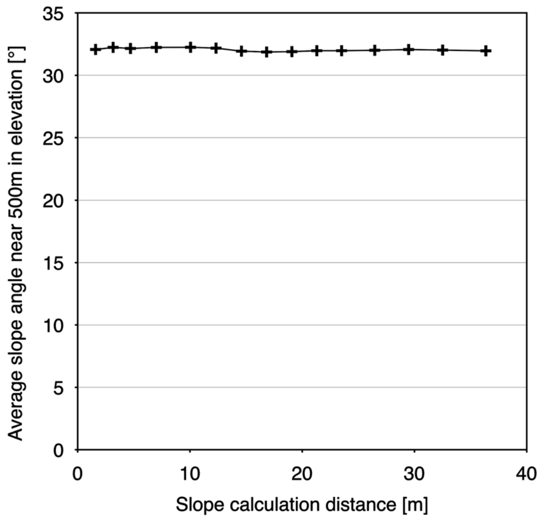


Fig. 5. The slope calculation distance vs. average slope angle at the elevation of 500 m.

0.82 m，21.31±1.13 m，29.49±1.01 m) で計算した結果を示している．SCD が短くなればより細かなスケールでの傾斜変化が反映される．SCD が長くなるにつれプロットされている領域が狭まっているが，これは基底部や頂上付近では SCD が長いと傾斜が求められないためである．大室山の斜面傾斜はほぼ一定であり，火砕物が降り積もり安息角を超えると斜面が崩れ再堆積を繰り返すことで成長する火砕丘の特徴を良く表している．しかしながら細かく見れば，傾斜角は完全に一定ではなく高度に応じてわずかに変化している．Fig. 6 の SCD＝20 m のグラフを見ると，傾斜角は頂上へ近づくにつれやや大きくなり，標高 540 m 付近から頂上へかけては標高 460 m 付近とほぼ同じ傾斜角へ変わる．また，SCD＝10 m では 565 m 以上の頂上部において傾斜が顕著に緩やかになっている．

5. 考　　察

5-1　既存の DEM との比較

本方法は使用機材も簡単で，予備的な準備も必要としないなど小型山体の傾斜の簡易測量法として優れている．特に DEM などが整備されていない未訪地において有効な方法である．しかしながら K-GPS 測量のデータから求めた傾斜角は必ずしも斜面の最大傾斜角とは一致

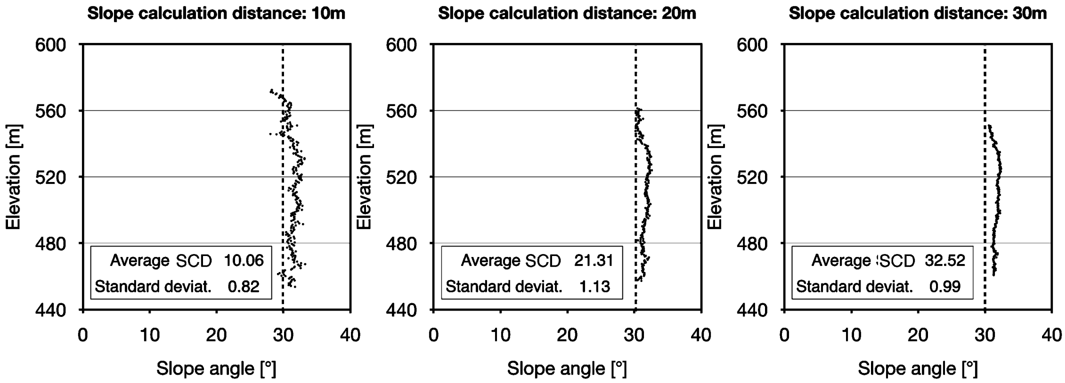


Fig. 6. Variation of slope angle with the elevation for 3 slope calculation distances : 10 m, 20 m and 30 m as a nominal value.

しない．これは測量時に等高線と直交して登ったという厳密な保証が計測時には得られないためである．本調査ではレシーバーを持った測量者周囲に複数の補助者を配して周囲の地形を見ながらルートの選択を指示したが，このような人為的な状況判断によって斜面の最大傾斜とどの程度ずれるのか，現実の調査データにおいて把握しておくことは意味がある．そこで今回の測量値の評価のために，公開されている国土地理院の基盤地図情報の5 m メッシュデータ（大室山付近のデータは FG-JPS-5239-20-DEM5A）との比較を行った．メッシュデータの水平方向の精度は標準偏差で 1.0 m 以内，垂直方向の精度は標準偏差で 0.3 m 以内となっている[注4]．Fig. 7 の上図は Fig. 5，Fig. 6 の傾斜値計算をおこなった大室山東斜面の踏査ルートの平面図である．背景は国土地理院の基盤地図情報であり，＋印は 5 m メッシュデータから踏査ルートに最近接のデータを拾い出したものである．それぞれの標高データを平面図の南西側基準線（白抜き四角形で表示）からの直交距離（平面図中の破線長方形の長辺と平行な距離）で表示したものが下図である．メッシュデータのデータ数は 5 m 間隔を反映して粗いが K-GPS 測量データとほぼ並行なトレンドを示す．一方で，標高値は＋3.0±0.05 m の系統的なずれを示している．このずれが何に起因しているものか，現時点では特定されていないが，本研究の主目的である斜面傾斜角の測量には影響は少ないと考えられる．水平距離 240 m までの全データを用いた平均傾斜角は K-GPS 測量が 27.44±0.06°，5 m メッシュデータが 27.34±0.05°となり傾斜値ではよい一致を見せる．今回は火砕丘という，斜面角度が構成物の安息角に支配されるためにほぼ一定であることが期待される火山地形をテストの対象とした．「1. はじめに」でも述べたが，火砕丘の斜面傾斜というのはこれまで詳細な解析・議論がなされておらず，どの程度の傾斜精度が必要なのかの基準がなかった．基準の設定には 1 つだけでなく多くの火砕丘に対して構成物と対応させた傾斜解析が必要であり，本研究では定めることができない．しかしながら，重要となるのは，1) 安息角を満たすか，2) 安息角を顕著に超えているか（構成物の溶結の影響はあるか）であると考えられる．したがって K-

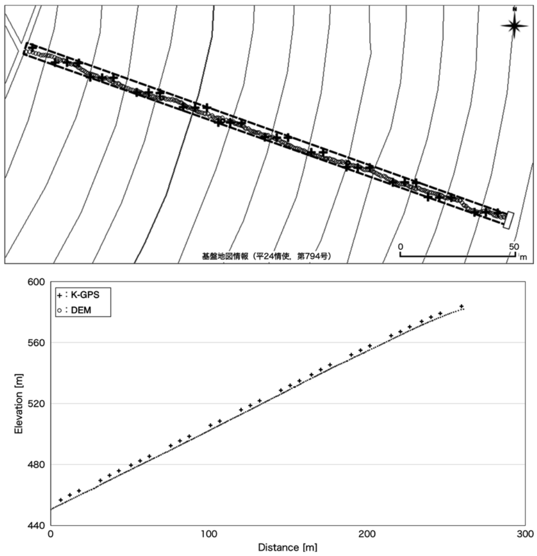


Fig. 7. Upper：An area to pick DEM points (＋) for estimating the topographic profile (lower). The base map is Kiban-Chizu-Jouhou（基盤地図情報）of Geospatial Information Authority of Japan. Lower：The topographic profile of Omuroyama from both K-GPS and DEM data (＋：K-GPS point, ○：DEM point).

[注4] 国土地理院 HP より，http：//www.gsi.go.jp/kiban/faq.html#3-3，2015 年 2 月 15 日閲覧

GPS と DEM の比較で得られた 0.1° の差はそれら判断の妨げにならない，微小な違いであると言える．

Fig. 6 において SCD＝20 m の K-GPS 計測値は 32±1° の一定の傾斜値を示すが，基底部と頂上部では小さい．頂上部は侵食や人為的な補修でやや傾斜が緩やかになっていた．基底部もやや緩やかではあったがその要因は植生に覆われており確認できなかった．DEM から求めた傾斜は斜面の最大傾斜であるが，我々の測量データは踏査ルート上で得たものであり，求めた傾斜は必ずしも最大傾斜ではない．

5-2　測量方法について

今回はアンテナをヘルメットの上に取り付け歩くというスタイルで測量を行い，有効性を確認した．一方で改善点も明らかになった．今回斜面の直登により斜面傾斜角の測量を行ったが，最大傾斜となるようなルート選択は補助者を配していても難しい．これを克服するには直線的ではなくジグザグに登坂するなど工夫が必要である．アンテナの姿勢保持にも問題があった．GPS 測位ではアンテナを真っすぐに保っていなければならないが，今回採用したヘルメットへの取り付けは斜面，特に下り斜面において進行方向の確認のための動作を制限する．このため大室山では下り斜面での測量は実施できなかった．これを改善するためにはアンテナを背負子に取り付けるなど，測量スタイルの変更が必要である．

6. ま　と　め

本研究では K-GPS という測量手法が DEM の未整備地域において火山の微地形解析に有効であるかを検証した．火山微地形では傾斜角の違いが構成物や噴火スタイルを推測する鍵となるので，K-GPS 測量データから傾斜角を計算し，既存の DEM データとの比較を行った．今回対象とした東伊豆の大室山火砕丘は構成物の安息角に支配された一定の山体傾斜を持つことが予想され，測量結果もほぼ一定の値 (32±1°) を示した．また DEM データとの比較の結果，K-GPS という簡易な測量からでも DEM データと整合性ある結果が得られた．今回の手法は DEM の整備されていない場所での傾斜測量に実用的であり，機動性も良いということが明らかになった．

謝　　辞

大室山リフトを管理している池観光開発株式会社，並びに池総有財産管理会の皆様の深いご理解のおかげで今回の調査を実施することができました．加藤照之氏（東京大学）には機器の提供並びに取り扱い，三浦　哲氏（東北大学）には RTKLIB での解析のご指導を頂きました．佐藤博明氏，匿名査読者，編集担当の横尾亮彦氏（京都大学）に頂いたコメントにより本論を大幅に改善することができました．上述した方々に感謝しここに謝意を表します．

引 用 文 献

Arciaga, M., Pastor, M., Batac, R., Bantang, J., and Monterola, C. (2009) Experimental observation and an empirical model of enhanced heap stability resulting from the mixing of granular materials, *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, P07040, doi : 10.1088/1742-5468/2009/07/P07040.

Favalli, M., Karátson, D., Mazzarini, F., Pareschi, M.T., and Boschi, E. (2009) Morphometry of scoria cones located on a volcano flank：A case study from Mt. Etna (Italy), based on high-resolution LiDAR data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 320-330, doi : 10.1016/j.jvolgeores.2009.07.011.

Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Petrinovic, I.A., Euillades, P.A., and Alvarado, G.E. (2009) Morphometry and evolution of arc volcanoes, *Geology*, **37**, 651-654, doi : 10.1130/G25734A.1.

Grosse, P., Euillades, P.A., Euillades, L.D., and van Wyk de Vries, B. (2014) A global database of composite volcano morphometry, *Bull. Volcanol.*, **76**, 784, doi : 10.1007/s00445-013-0784-4.

Hamilton, C.W., Thordarson, T., and Fagents, S.A. (2010a) Explosive lava–water interactions I：architecture and emplacement chronology of volcanic rootless cone groups in the 1783-1784 Laki lava flow, Iceland, *Bull. Volcanol*., **72**, 449-467, doi : 10.1007/s00445-009-0330-6.

Hamilton, C.W., Fagents, S.A., and Thordarson, T. (2010b) Explosive lava–water interactions II：self-organization processes among volcanic rootless eruption sites in the 1783-1784 Laki lava flow, Iceland, *Bull. Volcanol.*, **72**, 469-485, doi : 10.1007/s00445-009-0331-5.

早川由紀夫・小山真人 (1992) 東伊豆単成火山地域の噴火史 1：0～32 ka, 火山，**37**, 167-181.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (2001) Global Positioning System : Theory and Practice (5th Edition). Springer-Verlag Wien, Wien, p382.

Jessop, D.E., Kelfoun, K., Labazuy, P., Mangeney, A., Roche, O., Tillier, J.-L., Trouillet, M., and Thibault, G. (2012) LiDAR derived morphology of the 1993 Lascar pyroclastic flow deposits, and implication for flow dynamics and rheology, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **245-246**, 81-97, doi：10.1016/j.jvolgeores.2012.06.030.

Karátson, D., Favalli, M., Tarquini, S., Fornaciai, A., and Wörner, G. (2010) The regular shape of stratovolcanoes：A DEM-based morphometrical approach, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **193**, 171-181.

Kereszturi, G., Jordan, G., Németh, K., and Dóniz-Páez, J.F. (2012) Syn-eruptive morphometric variability of monogenetic scoria cones, *Bull. Volcanol.*, **74**, 2171-2185, doi : 10.1007/s00445-012-0658-1.

Keszthelyi, L., McEwen, A., and Thordarson, T. (2000) Terrestrial analogs and thermal models for Martian flood lavas,

J. Geophys. Res., **105**, 15,027–15,049.
古谷野裕・早川由紀夫・町田　洋 (1996) およそ 5000 年前に東伊豆単成火山地域で起こった大室山噴火の推移と継続時間，地学雑誌，**105**, 475–484, doi : 10.5026/jgeography.105.4_475.
守屋以智雄 (1986) 日本の火砕丘の地形計測，金沢大学文学部地理学報告，**3**, 58–76.
Robinson, D.A., and Friedman, S.P. (2002) Observations of the effects of particle shape and particle size distribution on avalanching of granular media, *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, **311**, 97–110.
佐田達典 (2003) GPS 測量技術，オーム社，東京，p163.
Samadani, A., and Kudrolli, A. (2001) Angle of repose and segregation in cohesive granular matter, *Phys. Rev. E*, **64**, 051301, doi : 10.1103/PhysRevE.64.051301.
高橋秀一・和田秀樹 (1998) 静岡大学 ^{14}C 年代データ集 2，静岡大学地球科学研究報告，**25**, 19–29.
Wood, C.A. (1980) Morphometric evolution of cinder cones, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **7**, 387–413.
Zimbelman, J.R., Garry, W.B., Johnston, A.K., and Williams, S.H. (2008) Emplacement of the 1907 Mauna Loa basalt flow as derived from precision topography and satellite imaging, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **177**, 837–847, doi : 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.042.

（編集担当　横尾亮彦）